
УДК 624.15

Об элементных фундаментах опор высоковольтных линий

В. Е. Козловский, И. М. Смирнов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Козловский В. Е., Смирнов И. М. Об элементных фундаментах опор высоковольтных линий // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 489–497. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-489-497

Аннотация

Цель: обосновать возможность применения фундаментов опор высоковольтных линий в виде рассредоточенных горизонтальных элементов, объединенных в единую конструкцию для восприятия знакопеременной нагрузки. Определить экспериментальным и расчетным методами эффект от взаимного смещения элементов в виде повышения несущей способности фундаментов и снижения их деформаций при воздействии вдавливающих и выдергивающих нагрузок. Показать возможность замены плитных фундаментов опор высоковольтных линий конструкциями из сборных элементов для снижения объема и веса перевозимых с завода изделий. **Методы:** применение фотограмметрического метода муаров для оценки развития зон уплотнения грунтов и угловых деформаций грунтового основания в лотке со стеклянной стенкой под моделями плитного и элементного фундаментов. Использование метода граничных интегральных уравнений для получения зависимости осадок от шага элементов для гибкого и жесткого фундаментов. **Результаты:** проиллюстрирован эффект взаимного влияния элементов фундамента при их сближении и рассредоточении в виде изменения напряженно-деформированного состояния в их основании. Выявлены различия в глубинах распространения зон уплотнения и областей развития угловых деформаций. Получены количественные данные по осадкам плитных и элементных фундаментов и влияние на них глубины залегания кровли прочного подстилающего слоя. Представлены графические зависимости связи осадок элементов с дистанцией (шагом) между ними. Показано влияние членения фундамента на скорость угасания краевых касательных напряжений в основании. Произведена иллюстрация увеличения объема и площади поверхности тела выпирания элементного фундамента, приводящего к увеличению его несущей способности по сравнению с плитным при расчете на выдергивание. **Практическая значимость:** показана эффективность применения элементного фундамента по сравнению с плитным вариантом в снижении параметров напряженно-деформированного состояния основания и облегчении логистических задач при строительстве. Используемые экспериментальная и расчетная методики могут быть рекомендованы для дальнейшего уточнения параметров элементных фундаментов.

Ключевые слова: сборные фундаменты, элементные фундаменты, метод фотограмметрии, метод муаров, метод граничных элементов, напряжения, деформации, осадки.

Введение

Инновации в энергетическом строительстве неразрывно связаны с новыми конструктивными решениями фундаментов опор высоковольтных линий (ВЛ). Эффективность новых конструкций фундаментов определяется снижением нагрузок на основание и экономией материалов при обеспечении эксплуатационной надежности сооружения. Важным также является облегчение логистических задач, снижение затрат на транспортировку крупногабаритных грузов и на использование тяжелой грузоподъемной техники.

В настоящее время широкое применение в качестве фундаментов опор ВЛ имеют железобетонные грибовидные конструкции заводского изготовления, обладающие большими объемом и весом [1]. Имеются технические решения по разделению таких фундаментов на две составляющие: стоечную и плитную части с одним монтажным стыком [2]. Располагаясь в наиболее напряженной части фундамента, стык является «слабым звеном» в конструкции, и надежность ее может оказаться сниженной, что не соответствует требованиям [3, 4]. При этом два стыкуемых элемента остались крупными по массе и объему.

Вопросом, заслуживающим рассмотрения, является замена плитной части фунда-

мента на систему рассредоточенных горизонтальных элементов, передающих нагрузку на выше либо ниже расположенное грунтовое основание в зависимости от характера работы фундамента (рис. 1).

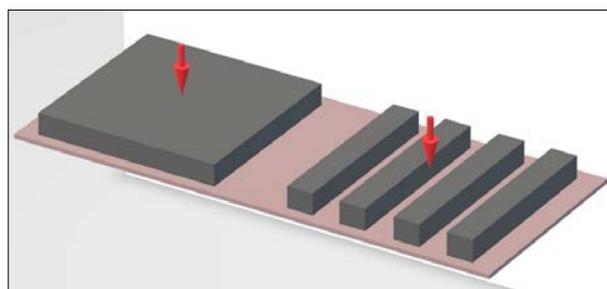


Рис. 1. Плитная и элементная схемы фундаментов

Эффект от членения фундамента на элементы с их взаимной раздвижкой иллюстрируется на рис. 2, на котором изображены участки эпюр влияния давлений от боковых элементов на напряженное состояние грунта под центральным элементом. Эпюры влияния представляют собой убывающие от зоны передачи давления функции.

При рассматривании точки основания под центральным элементом со сближенными (слева) и рассредоточенными (справа) боковыми элементами очевидно различие в ее напряженном состоянии.

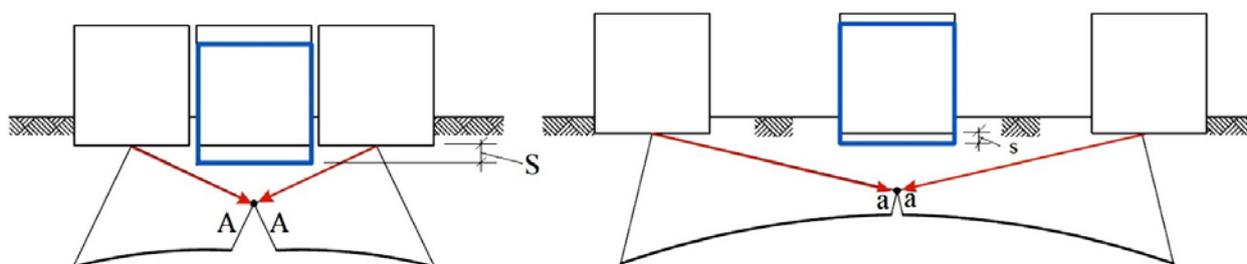


Рис. 2. Иллюстрация влияния раздвижки элементов фундамента на напряженное состояние основания

Суммарное влияние крайних элементов на напряженное состояние исследуемой точки основания под центральным элементом равно $A+A$ при сближенных элементах и $a+a$ при рассредоточенных. Поскольку деформации порождаются напряжениями, можно утверждать, что меньшие напряжения при рассредоточении нагрузок порождают меньшую осадку элементов, чем при их сближении, то есть $s < S$.

Таким образом, предлагается расчленить фундамент и рассмотреть дискретную передачу нагрузки от горизонтальных элементов фундамента на грунт взамен сплошному контакту его с плитой.

Рассмотрены инструментальный и численный способы нагружения поверхности грунтового основания.

Экспериментальная и расчетная реализации задачи

Инструментальный способ предполагает испытание модели грунтового основания и фундамента в лотке со стеклянной стенкой. Замер деформаций производится методом фотограмметрии с использованием оптического муарового эффекта [5]. Он позволяет оценить по естественному растру, создаваемому зернистой структурой грунта, возникающие в грунте угловые деформации с получением остальных (осевых) компонент деформаций.

Одинаковая нагрузка, передаваемая на основание через жесткую плиту и два элемента равной общей площади, приводит к образованию неравных по глубине распространения зон уплотнения (рис. 3). Таким образом, можно утверждать, что размер и глубина развития зон уплотнения при равных нагрузках для элементного фундамента оказывается меньшей, чем для плитного варианта.

Представляет интерес величина центральной вертикальной нагрузки, вызывающая равную осадку плитного и элементного фундаментов. В качестве примера рассмотрены фундамент под опоры ВЛ типа Ф3-А с размером плиты $2,1 \times 2,1$ м [6] и фундамент из 4 горизонтальных элементов сечением $0,35 \times 0,35$ м длиной 2,45 м, расположенных с просветом 0,35 м (рис. 4). Для расчета принят грунт основания с модулем деформации $E = 20$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,35$. Фундаментам задана равная вертикальная осадка 3 см.

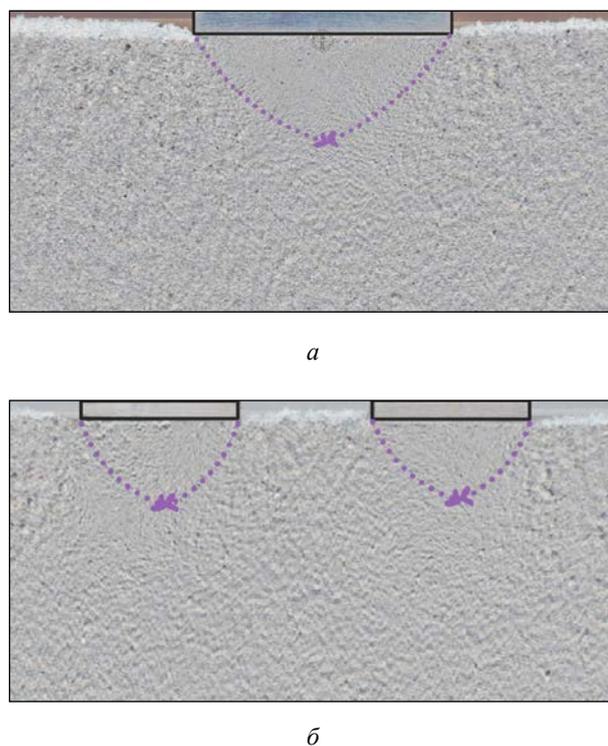


Рис. 3. Зоны уплотнения основания в моделях плитного (а) и элементного (б) фундаментов

Требуемая вертикальная нагрузка при заданной равной осадке обоих фундаментов различна и определяется нахождением площади под графиками контактных давлений.

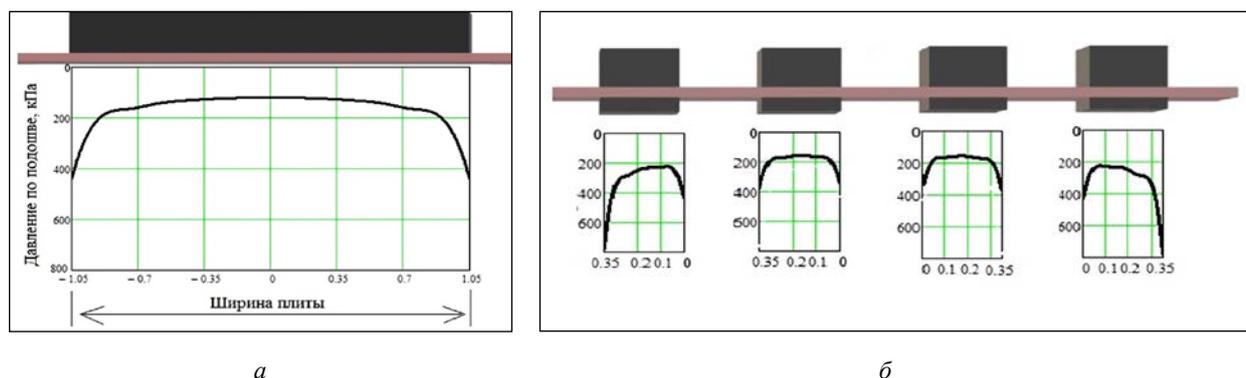


Рис. 4. Контактные давления по подошве плитного (а) и элементного (б) фундаментов при задании равной осадки

Для принятых условий усилие вдавливания для плитного фундамента равно 80 тс, для элементного 97 тс. Таким образом, рассредоточение на грунте опорных элементов привело при заданной осадке к возрастанию несущей способности фундамента.

Наличие в грунтовом массиве скального подстилающего слоя на глубине 5 м от подошвы фундаментов повышает требуемое усилие вдавливания при заданной осадке 3 см для плитного и элементного фундаментов соответственно до 126 тс и 157 тс. Это означает, что снижение мощности сжимаемого слоя увеличивает эффект от рассредоточения элементов.

Результаты вычислений

Произведены расчеты плитных и элементных фундаментов методом граничных элементов [7, 8] при заданных равных осадках элементов и при равных давлениях по подошве. Первый вариант соответствует случаю абсолютно жесткого фундамента, второй — гибкому (по Винклеру). Подошва фундаментов принята шероховатой.

При анализе контактных давлений по подошве фундаментов, вызвавших заданную

осадку, удобно переходить к понятию коэффициента постели C_b , равного отношению давления (кПа) по подошве к возникающей при этом осадке (см).

Рассмотрен случай равной осадки всех элементов с расстоянием в свету d на грунтовом основании с указанными ранее деформативными характеристиками. График на рис. 5 показывает, что при раздвижке четырех балок шириной 0,35 м от $d = 0$, соответствующего их плотному смыканию в жесткую плиту, до дистанции 1 м, приводит к возрастанию коэффициента постели от 80 до 114 кПа/см.

Характерно то, что возрастание несущей способности произошло при одинаковой площади (нетто) опирания плитного и элементных фундаментов на грунт.

Анализ графиков контактных давлений на рис. 4 показывает, что грунтовое основание под крайними элементами является перегруженным по сравнению с плитным вариантом. В этом случае зоны максимальных напряжений под крайними элементами будут «подрезаны» предельными для грунта значениями давлений.

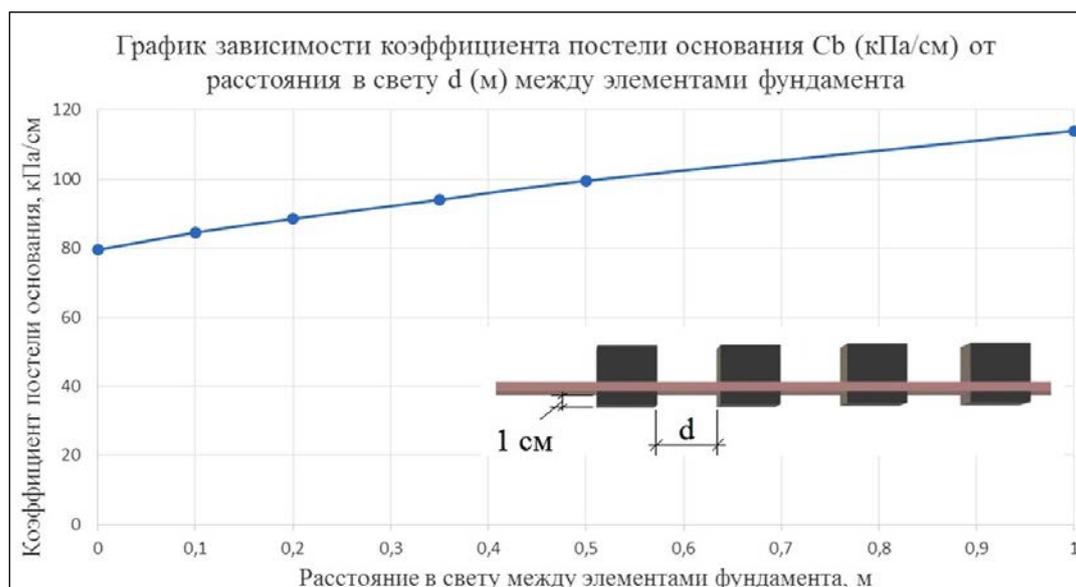


Рис. 5. Зависимость коэффициента постели от дистанции между элементами фундамента при их равной осадке

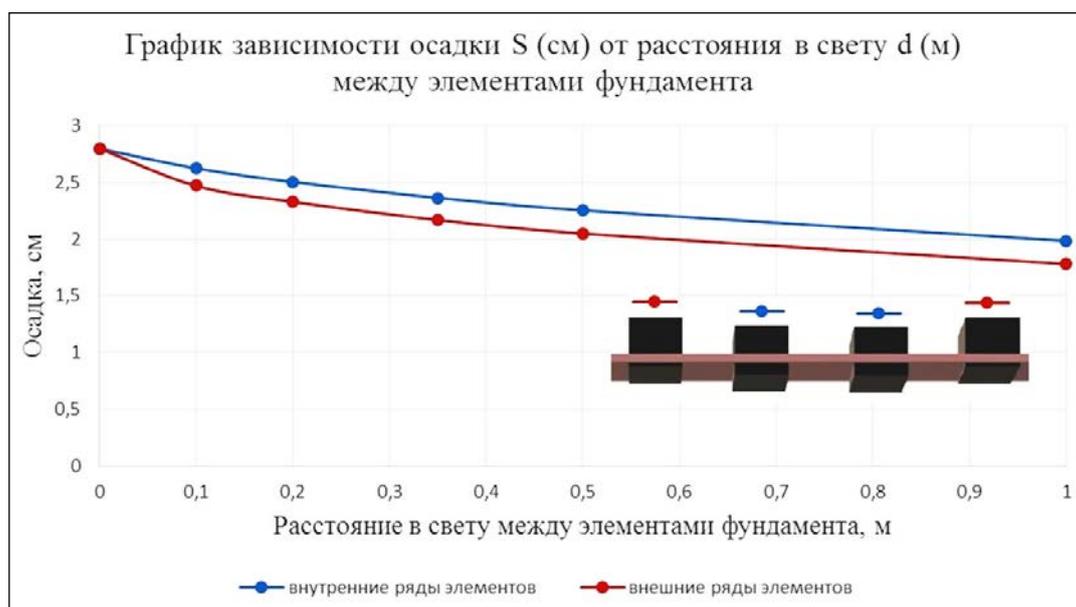


Рис. 6. Зависимость осадки от дистанции между элементами фундамента при равном давлении по подошве

При задании граничных условий в виде постоянных давлений по подошве, равных 200 кПа, максимальная осадка при раздвижке элементов будет снижаться (рис. 6). Внутренние ряды имеют осад-

ку большую, чем внешние. Осадка при $d = 0$ м соответствует варианту фундамента в виде гибкой плиты, по подошве которой действуют постоянные по величине давления.

Как следует из полученных графических зависимостей, как в случае жесткого, так и в случае гибкого элементного фундамента, прослеживается их преимущество перед плитной конструкцией. В «жестком» случае элементный фундамент имеет больший коэффициент постели, в «гибком» — меньшая осадка элементов в сравнении с плитным вариантом. Характер работы реального фундамента конечной жесткости соответствует промежуточному положению между рассмотренными жестким и гибким случаями.

Рост угловых деформаций в основании происходит в соответствии с ростом касательных напряжений (рис. 7, а), величины которых получены исходя из двух условий

нагружения (граничных условий): постоянства по подошве осадок или давлений. В расчетах горизонтальные перемещения грунта по подошве фундаментов были запрещены в граничных условиях. В лотковых моделях шероховатость создавалась материалами на подошве моделей фундаментов.

Под жесткими плитным и элементным фундаментами при равных осадках касательные напряжения близки по значениям (рис. 7, б). При равных давлениях по подошве гибких фундаментов осадки их также близки, но элементный фундамент оказывается более эффективным вследствие меньших сдвигов в основании и, как следствие, большем расчетном сопротивлении грунта основания.

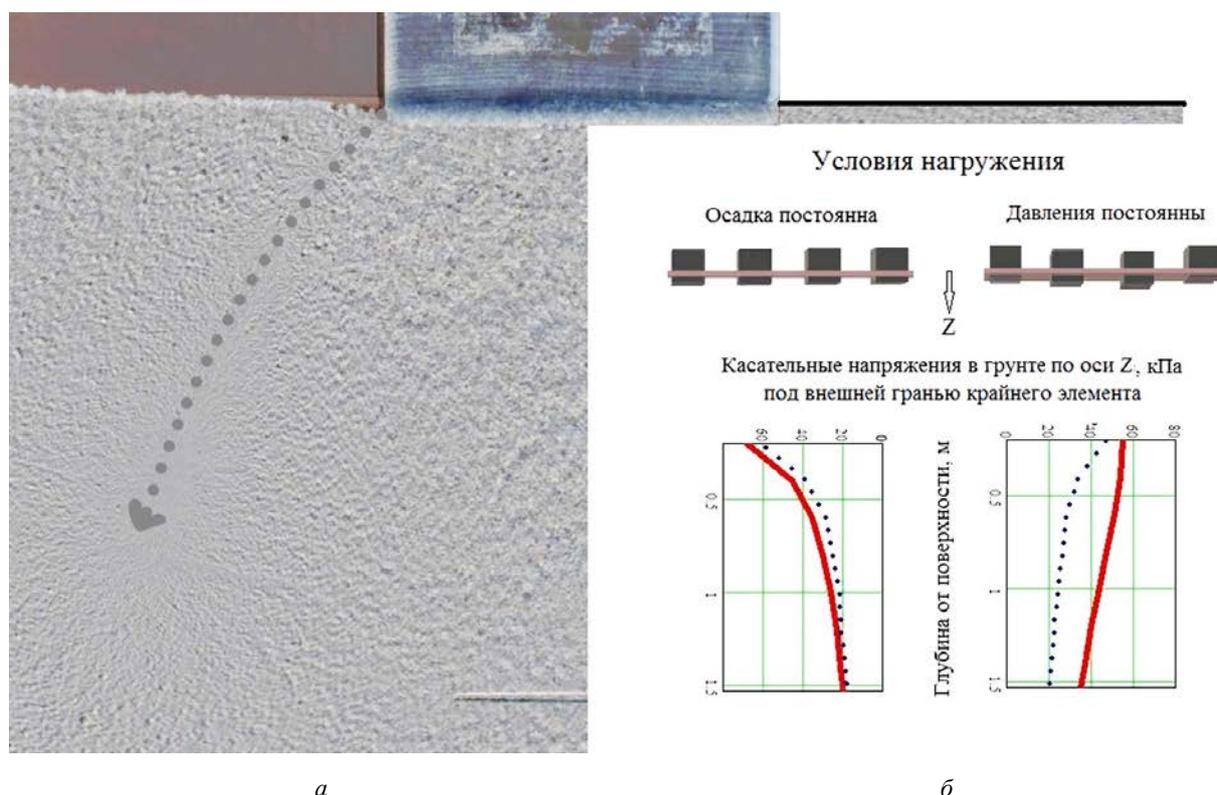


Рис. 7. Траектория роста угловых деформаций (а) и графики касательных напряжений при разных условиях нагружения (б): сплошная линия — плитный фундамент, пунктир — элементный фундамент

Расчет плитных и элементных фундаментов опор ВЛ на вырывание по деформациям может быть произведен по методикам, изложенным в [9, 10].

При расчете по несущей способности определяющими являются объем, вес и площадь боковых граней тела выпирания, опирающегося подошвой на верхний обрез фундамента. Усеченная пирамида тела выпирания, характерная для плиты, приобретает в основании пилообразную форму при опирании на элементный фундамент (рис. 8).

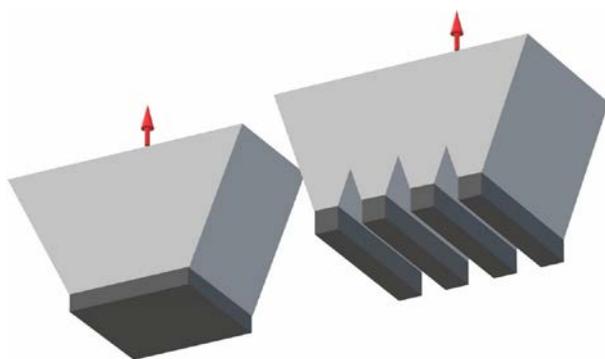


Рис. 8. Тела выпирания для плитного и элементного фундаментов

Потери объема тела выпирания при раздвижке элементов за счет клиновидных зон на его подошве компенсируются существенным приростом объема в верхней зоне. При качественном уплотнении грунта обратной засыпки это дает существенное увеличение предельной выдерживающей силы.

Клиновидные зоны, в свою очередь, увеличивают удельную поверхность тела выпирания и поверхностей сдвига, что усиливает роль характеристик прочности грунта обратной засыпки в предельной силе выдерживания.

Очевидно, что перспективным является взаимно перекрестное, ортогональное положение элементов, в результате которо-

го фундамент приобретет крестовую либо ячеистую форму. Это позволит увеличить его геометрическую неизменяемость, жесткость и даст возможность эффективнее использовать при наличии горизонтальных составляющих внешней нагрузки.

Заключение

Элементные фундаменты опор высоковольтных линий, работающие на знакопеременные нагрузки, имеют ряд преимуществ перед плитными. Рассредоточение элементов, передающих давление на грунт, приводит к снижению деформаций и увеличению несущей способности фундамента на сжимающие и выдергивающие нагрузки. При одинаковых параметрах напряженно-деформированного состояния основания плитных и элементных фундаментов последние приводят к экономии материалов и облегчению логистических задач при сооружении фундаментов.

Следующим этапом следует считать разработку конструктивного решения элементного фундамента из ортогональных элементов с решением вопроса об используемых материалах и конструкциях стыков элементов.

Библиографический список

1. Фундаменты под унифицированные металлические опоры ВЛ 35-330 кВ, серия 3.407-115.
2. Унифицированные конструкции фундаментов для стальных опор ВЛ 35-500 кВ, серия 3.407.1-144.
3. Федеральный закон № 196-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «об электроэнергетике» в части совершенствования требований к обеспечению надежности и безопасности электроэнергетических систем и объектов электроэнергетики».
4. Правила устройства электроустановок (ПУЭ-7), Министерство энергетики РФ. 504 с.

5. Голкин Д. В., Емельянов Е. В., Козловский В. Е. Исследование моделей грунтового основания методом фотограмметрии // *Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. Сборник трудов LXXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (в 2 томах). Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I*. 2023. С. 203–207.
6. Реут М. А., Рокотян С. С. Справочник по проектированию линий электропередачи. М.: Энергия, 1980. 296 с.
7. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. М.: Мир, 1987. 328 с.
8. Кавказский В. Н., Козловский В. Е. и др. Программа расчета выработки методом граничных элементов. Номер свидетельства о гос. регистрации RU2020663522, дата регистрации: 21.10.2020.
9. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» / Минстрой России. М.: Стандартинформ, 2016. 186 с.
10. Сливец К. В., Колмогорова С. С., Коваленко И. А. Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2022. Т. 19, вып. 2.
11. Козловский В. Е., Касаткина А. В. Расчет деформаций оснований выдергиваемых фундаментов опор ВЛ // *Фундаменты*. 2023. № 2 (12). С. 52–53.

Дата поступления: 26.04.2024

Решение о публикации: 26.05.2024

Контактная информация:

КОЗЛОВСКИЙ Владимир Евгеньевич —

канд. техн. наук, доцент;

koslovskii@mail.ru

СМИРНОВ Иван Михайлович — аспирант;

sm.ivan00@gmail.com

About the elemental foundations of the supports of high-voltage lines

V. E. Kozlovskii, I. M. Smirnov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kozlovskii V. E., Smirnov I. M. About the elemental foundations of the supports of high-voltage lines // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 489–497. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-489-497

Abstract

Purpose: to substantiate the possibility of using the foundations of supports of high-voltage lines in the form of dispersed horizontal elements combined into a single structure for the perception of alternating loads. To determine by experimental and computational methods the effect of the mutual displacement of elements in the form of an increase in the bearing capacity of foundations and a decrease in their deformations under the influence of pressing and pulling loads. To show the possibility of replacing slab foundations of supports of high-voltage lines with structures made of prefabricated elements to reduce the volume and weight of products transported from the factory. **Methods:** application of the moire photogrammetric method to assess the development of soil compaction zones and angular deformations of the soil base in a tray with a glass wall under models of slab and elemental foundations. Using the method of boundary integral equations to obtain the dependence of precipitation on the step

of elements for flexible and rigid foundations. **Results:** the effect of mutual influence of foundation elements during their convergence and dispersal in the form of a change in the stress-strain state in their base is illustrated. Differences in the depths of the distribution of compaction zones and areas of development of angular deformations are revealed. Quantitative data on the precipitation of slab and elemental foundations and the influence of the depth of the roof of the solid underlying layer on them have been obtained. Graphical dependences of the relationship of sediment elements with the distance (step) between them are presented. The effect of the division of the foundation on the rate of extinction of marginal tangential stresses in the base is shown. An illustration is made of an increase in the volume and surface area of the bulging body of the elemental foundation, which leads to an increase in its bearing capacity compared to the slab one when calculating for pulling out. **Practical importance:** the effectiveness of the use of an element foundation in comparison with the paid option in reducing the parameters of the stress-strain state of the base and facilitating logistical tasks during construction is shown. The experimental and computational methods used can be recommended for further refinement of the parameters of the elemental foundations.

Keywords: prefabricated foundations, elemental foundations, photogrammetry method, moire method, boundary element method, stresses, deformations, precipitation.

References

1. Fundamenty pod unificirovannye metallicheskie opory VL 35-330 kV, seriya 3.407-115. (In Russian)
2. Unificirovannye konstrukcii fundamentov dlya stal'nyh opor VL 35-500 kV, seriya 3.407.1-144. (In Russian)
3. Federal'nyj zakon № 196-FZ "O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon "ob elektroenergetike" v chasti sovershenstvovaniya trebovanij k obespecheniyu nadezhnosti i bezopasnosti elektroenergeticheskikh sistem i ob"ektov elektroenergetiki" ot 23.06.2016. (In Russian)
4. Pravila ustrojstva elektroustanovok (PUE-7), Ministerstvo energetiki RF. 504 s. (In Russian)
5. Golkin D. V., Emel'yanov E. V., Kozlovskij V. E. Issledovanie modelej gruntovogo osnovaniya metodom fotogrammetrii // Transport: problemy, idei, perspektivy. sbornik trudov LXXXIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (v 2 tomah). Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I. 2023. S. 203-207. (In Russian)
6. Reut M. A., Rokotyanyan S. S. Spravochnik po proektirovaniyu linij elektropredachi. M.: Energiya, 1980. 296 s. (In Russian)
7. Krauch S., Starfield A. Metody granichnyh elementov v mekhanike tvyordogo tela. M.: Mir, 1987. 328 s. (In Russian)
8. Kavkazskij V. N., Kozlovskij V. E. i dr. Programma raschyota vyrabotki metodom granichnyh elementov. Nomer svidetel'stva o gos. registracii RU2020663522, data registracii 21.10.2020. (In Russian)
9. SP 22.13330.2016 "Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannayaredakciya SNiP 2.02.01-83*" / Ministroy Rossii. M.: Standartinform, 2016. 186 s. (In Russian)
10. Slivec K. V., Kolmogorova S. S., Kovalenko I. A. Parametry merzlyh gruntov pri chislennom modelirovani teplofizicheskikh zadach // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2022. T. 19, vyp. 2. (In Russian)
11. Kozlovskij V. E., Kasatkina A. V. Raschet deformatsij osnovanij vydergivaemyh fundamentov opor VL // Fundamenty. 2023. № 2 (12). S. 52-53. (In Russian)

Received: 26.04.2024

Accepted: 26.05.2024

Author's information:

Vladimir E. KOZLOVSKII — PhD in Engineering, Associate Professor;
koslovskii@mail.ru
Ivan M. SMIRNOV — postgraduate student;
sm.ivan00@gmail.com